

理想的なまくらぎ (Ideal-MAKURAGI) の開発

Development of an ideal sleeper



須江 政喜*



奥村 悠樹**



堀 雄一郎*



小野寺 孝行*

A pre-stressed concrete sleeper is currently designed by the concept of about 50 years ago. As a result of our investigation of the pre-stressed concrete sleepers which have been used in tracks for about 40 years, most of them remain their strength enough. So we have started our research to make the sleeper height thin, reviewing the strength of it depending on track conditions. On the other hand, the material of an Under Sleeper Pad (USP) which is recognized its effectiveness for reducing track settlement, is rubber in Japan and urethane in Europe respectively. We confirmed that the performance of reducing track settlement of urethane was superior to that of rubber by our cyclic loading test. Since we will expect various effects of urethane, we have started the research of the urethane to use as material of the USP. From now on, we will develop the so called "Ideal Sleeper" which is suitable sizes and is composed of effective resilient materials in order to mitigate our maintenance works.

●キーワード：まくらぎ、弾性まくらぎ、USP (Under Sleeper Pad)、道床

1. はじめに

まくらぎは、レールを固定し軌間を保持するとともに、レールから伝達される列車荷重を広く道床に分散させる重要な役割がある。現在、特殊区間を除き、コンクリート製のPCまくらぎが主に採用されている。敷設後約30年から50年経過したまくらぎの強度を調査したところ、ほぼ健全な状態であったことから、まくらぎの設計強度を見直し、まくらぎの薄型化について研究することとした。また、軌道沈下抑制に一定の効果をあげている弾性まくらぎの弾性材（以下、USPという。）について、国内ではゴムが主流であり、欧州ではウレタンが製品化・導入されている。特にウレタンは、軌道沈下抑制の他、様々な効果が期待できることから、ウレタンを用いた理想的な物性・形状を持つUSPについて研究することとした。本稿では、まくらぎの薄型化および効果的なUSPによる「理想的なまくらぎ (Ideal-MAKURAGI)」(以下、I-MAKURAGIという。)の開発に関する取り組みについて紹介する。

2. PCまくらぎの設計強度と薄型化の可能性

当社で開発した下級線用PCまくらぎをはじめ、国鉄時代から様々なPCまくらぎを開発・導入してきた。しかし、まくらぎの設計強度は、国鉄時代の1961年に開発された3号まくらぎ開発時の考えによるもので、現在も継続して採用されている。一方、PCまくらぎの耐用年数は明らかになっていないため、敷設後約30年から50年程度経過（一部、10年程度含む）したまくらぎの劣化状況を調査し、設計強度等について検討することとした。

2.1 経年30年から50年程度のまくらぎ強度

2013年度にまくらぎ表面にひび割れが生じていたり、締結装置のボルトを入れる埋込栓が損傷したことによる不良PCまくらぎのうち、敷設後約30年から50年経過した不良PCまくらぎ(図1)の劣化状態を調査するため、各支社から合計103本集約し、まくらぎの外観調査や強度試験等を実施した。



図1 不良まくらぎ

このうち、埋込栓引抜強度試験(図2)の結果は図3のようになり、JISで定められた荷重を載荷した際、破壊してはならない規格値を下回るものが5割程度、ひびが生じてはならない保証荷重を下回るものが2割程度であり、埋込栓の損傷および劣化の割合が多い結果となった。なお、敷設経過年数による埋込栓破壊耐力は、バラツキはあるものの有意差はなかった。

また、図4のようにコア抜きした供試体を用いて、コンクリート圧縮強度試験を行った結果、2割程度が規格値を下回る結果となったものの、残りはほぼ健全な状態であることが確認された。なお、経年による劣化傾向はみられなかった。(図5)

その他、曲げ強度やPC鋼材のプレストレス量・腐食状況等(図6)についてもほぼ健全な状態であったことから、経年30年から50年程度のまくらぎ本体の機能は低下していないこ

とがわかった。

以上より、不良まくらぎの主な原因としては、埋込栓の強度不足によるものが主な原因と考えられるが、埋込栓不良を除くと、まくらぎ本体の強度は大多数が保持されていることがわかった。



図2 埋込栓引抜強度試験方法

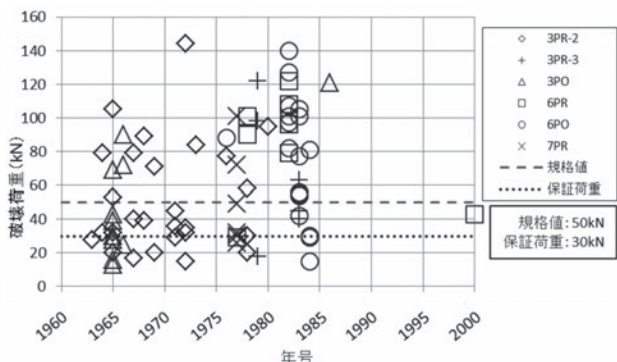


図3 埋込栓引抜強度試験結果

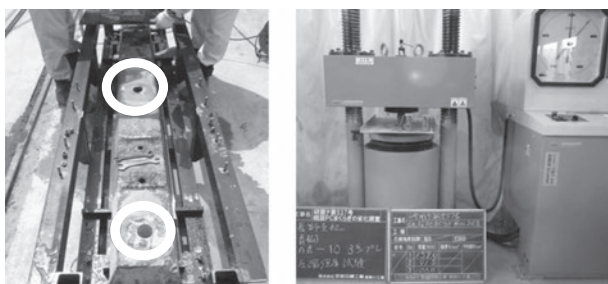


図4 圧縮強度試験に用いるコア抜き

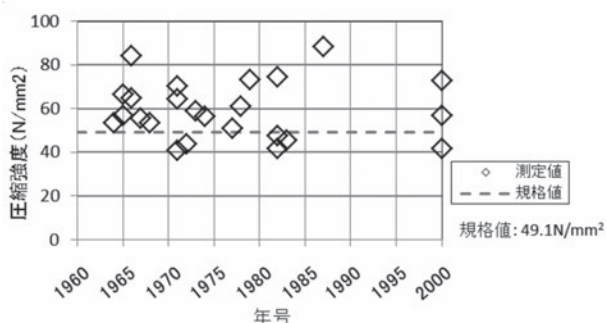


図5 圧縮強度試験結果



図6 PC鋼材の状態

2.2 現在の設計強度

まくらぎの設計荷重は、輪重（車輪からレールに加わるレール面に垂直な力）に分散率や輪重変動率を乗じて求める。このうち、分散率は、現在の軌道状態での実情が明らかでなく、また、輪重変動率とはレール継目部の衝撃率を考慮しているが、継目部以外の比較的安定している軌道については、過剰な評価をしている可能性がある。また、前項で述べたように、調査した経年まくらぎは、強度的にはほぼ健全な状態であったことから、継目部以外のPCまくらぎにおいては、現在採用されている設計強度がオーバースペックである可能性が高いといえる。

2.3 PCまくらぎの薄型化の可能性

まくらぎ設計強度を求めるための設計荷重について、まくらぎを敷設する線区レベルや敷設箇所の条件（継目部または一般部）を考慮するとともに、分散率や輪重変動などの列車通過時の挙動を正しく把握し、これまで採用されてきた設計強度を見直すことにより、現行より薄型のPCまくらぎを設計することが可能となる。

2.4 薄型まくらぎの効果

薄型PCまくらぎが実現することにより、現行のまくらぎから交換する際、線路こう上作業および構造的に制限がある箇所は路盤低下など大規模な改良をすることなく道床厚の確保が可能となる。また、道床部が固結しているような比較的条件が悪い箇所では、薄型になった厚さ分に図7のように調整層となるバラストを挿入することから、交換後、道床内の排水の改善にも繋がる可能性がある。

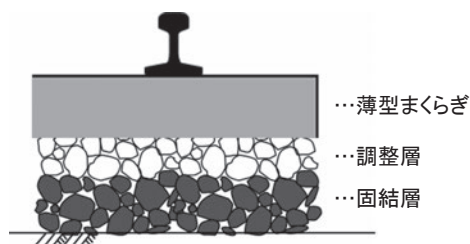


図7 薄型まくらぎ化の道床イメージ

2.5 これまでの特殊区間でのPCまくらぎ効果

中央本線(上り)大月構内には、省メンテナンスを目的として、PCまくらぎ使用の分岐器が敷設されている。(図8) 敷設後20年が経過しているが、最近5年間の補修履歴では、軌道の不陸を補修するための分岐器全体の道床つき固め作業が1回その他、分岐器部材の定期的な材料交換程度であり、現場付近の分岐器と比べても省力化効果は大きいと言える。PC分岐まくらぎの薄型化・軽量化が可能となれば、材料価格の低廉化やまくらぎ交換時の施工性が飛躍的に向上すると考えられる。



図8 中央本線大月構内PCまくらぎ使用の分岐器

また、仙山線の一部橋りょうには、PC橋まくらぎが敷設されており(図9)、この箇所も敷設後20年程度経過しているが、最近の補修履歴をみても材料交換等の実績はなく、良好な状態を維持している。今後、薄型化などの改良を加えた理想的なPC橋まくらぎの開発が実現すれば、現行の合成マクラギに比べて、大幅な材料費のコストダウンが可能である。



図9 仙山線PC橋まくらぎ

3. 今後行う動的挙動の確認と設計強度の見直し

今後、PCまくらぎの使用条件に応じた設計条件を見直し、その根拠となるデータ収集を行う計画である。本稿では、その際に行う測定内容及び方法について紹介する。

3.1 最先端のICTを活用した動的挙動把握

列車通過時の動的挙動を把握するため、モーションキャプチャー技術を活用する。モーションキャプチャー技術とは、対象物に装着したマーカーの動きをカメラで撮影・解析し、速度、角度、加速度等の測定が可能な技術である。例えば、図10

のように、身体の関節部等にマーカーを取付け、投球動作をすることで全身の動きや投球時の手首の速度等を測定することができる。この技術は、人体の計測や解明をはじめ、様々な分野で活用されている。

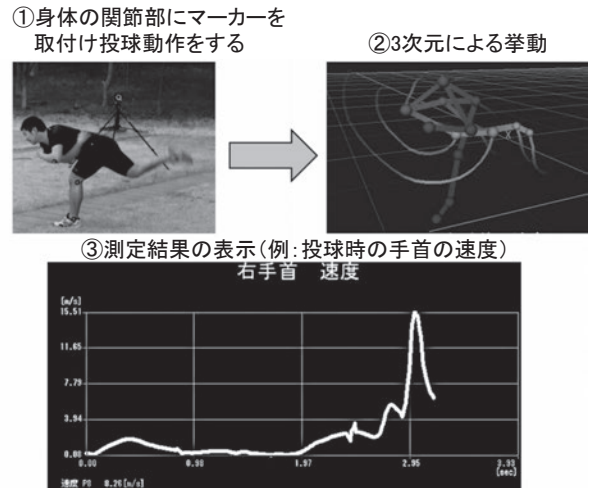


図10 モーションキャプチャーの例

過去に列車通過時のまくらぎの挙動把握等に活用できるか確認するため図11のようにまくらぎ上にマーカーを取付けて測定した結果、図12のように3両編成の列車が通過した際の車軸毎の軌道沈下や車輪通過時のアップリフト(まくらぎに車輪が載荷した時に、前後のまくらぎが浮き上がる現象)といった動的挙動を捉えることができた。従来の測定方法では、変位計に用いるための各種機器が多数必要であり、また、変位計を対象物に設置する作業に多くの時間や労力を要していたが、この技術を活用することで作業効率を上げることや線路外にカメラを設置することが可能であることから(図13)、安全性の向上にも繋げることができる。今後は、営業線において、この技術を活用し、まくらぎの動的挙動特性を確認する計画である。



図11 マーカー

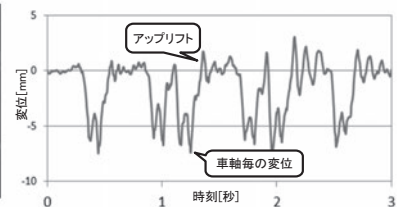


図12 列車通過時の挙動



図13 カメラの設置状況

3.2 営業線軌道の調査による設計強度の見直し

営業線軌道において、特急車両走行線区や貨物車両走行線区といった様々な線区条件において、図14のような圧電素子を使用した圧力センサ付軌道パッドにより列車通過時のレール下面圧力測定する。なお、この圧力センサ付軌道パッドは、従来型のひずみ計や加速度計を埋め込んだ軌道パッドに比べ、材料コストを大幅に削減することができるため、より長い延長での測定が可能になるなどの利点がある。このレール圧力測定の結果をふまえ、図15のようにまくらぎに載荷した動的荷重が前後の軌道にどの程度分散されるかの荷重分散率を詳細に調査し、線区条件における実態から、まくらぎの設計強度見直しを図る計画である。



図14 圧力素子を用いたセンサ付軌道パッド

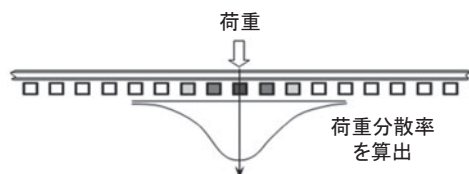


図15 荷重分散

4. 弾性まくらぎに用いる USP の可能性

軌道沈下抑制等を目的に開発されたUSPは、国内ではゴムを主流とし、その効果が確認されている。一方、欧州ではウレタンを使用したUSPが多数製品化・導入されていることから、それらの特性をふまえ、現場に適したUSPの開発に取り組むこととした。

4.1 これまでの弾性まくらぎの効果

保守の省力化及び振動低減等を目的として、国内でも30年程前から図16のような弾性まくらぎの研究が進められている。弾性まくらぎに用いるUSPは、主にゴム（SBR）やウレタンがあり、国内でもそれらの材料を使用した各種試験を行ってきたが、材料コスト等により、ゴムが主流となっている。これまでに、図17のような軌道沈下抑制効果は一定の評価は得られているものの広く普及していない現状がある。また、弾性まくらぎの具体的な抑制効果等について、効果的なばね定数や厚さは未知数であるため、実物大軌道試験装置で検証することとした。



図16 弾性まくらぎ

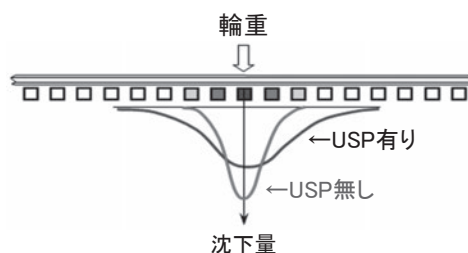


図17 USPの沈下抑制効果

4.2 実物大試験装置による弾性まくらぎの効果

2013年度に国内外のUSP（ゴムおよびウレタン）を使用した弾性まくらぎの沈下特性等について、図18のような実物大軌道試験装置により試験を行った。



図18 実物大軌道試験装置

試験で使用したUSPは、表1に示すように、ゴム3種、ウレタン3種の合計6種類である。また、USPの厚さは10mm～20mmのものを使用した。ここで、BM値とは、欧州で弾性率等の物性値を表すために一般的に用いられている単位であり、これを参考として各種材料の物性値とした。

表1 USPの種類と物性

	試験片200mm × 200mm					
	A社 ウレタン	B社 ゴム	C社 ゴム	D社 ゴム	E社 ウレタン-1	E社 ウレタン-2
実測BM値 (kN/m ²)	7	8	8	9	11	21
厚さ(mm)	10	20	15	15	10	10

荷重条件は、輪重51kN（EF66相当の輪重に荷重分担率を考慮）、周波数7Hz（V=60km/h程度）とし、軌道における初期沈下後の沈下進みが確認できる60万トンまでの繰り返し载荷を行った（図19）。その結果、図20のようになり、USPなし、ゴム、ウレタンで有意差は見られなかった。一方、初期沈下後の20万トンから60万トンまでの沈下進み量を比較すると、図21のようになった。USPなしのまくらぎに比べ、弾性まくらぎは沈下抑制効果があり、また、USPを比較した場合、ゴムに比べウレタンの方が沈下量は少ない傾向となった。また、図22のように道床横抵抗力を測定した結果、ウレタン3種が他のゴム3種に比べ、抵抗力が高い結果となった（図23）。これは、碎石がUSPに多く食い込むことで接触面積が大きくなり、まくらぎ底面が負担する横抵抗力が増加しているためと想定される。

なお、沈下抑制に効果がある形状、ばね定数、USP下の振動等においては定量的な特徴や傾向が見受けられなかったため、最適な材質を特定することはできなかった。



図19 繰り返し载荷試験

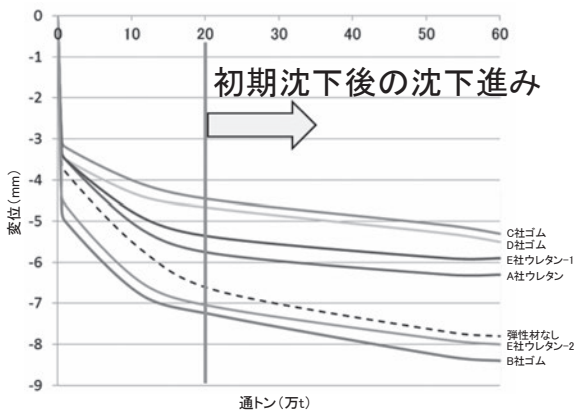


図20 各種弾性まくらぎの沈下比較

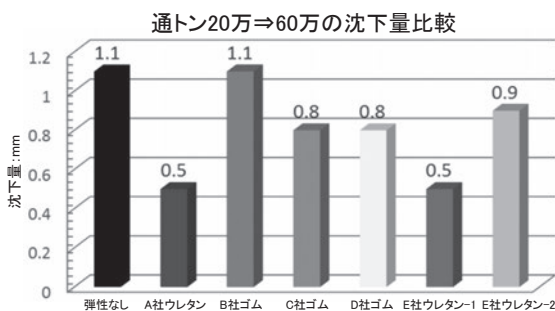


図21 各種弾性まくらぎの初期沈下後の沈下進み比較

4.3 ウレタンを用いたUSPの期待

前述のとおり、弾性まくらぎに用いるUSPは、国内ではゴムが主流である。一方、欧州では、ここ最近ウレタンが主流となっており、線形条件や目的に合わせて多数製品化・導入が進められている。ウレタンの特徴は、柔軟性や緩衝性に優れている他、材質自体に弾塑性変形特性を持っている。弾塑性変形を有することで、図24のようにまくらぎ底面と碎石の接触面積が大きくなり、碎石の摩滅や流動を防ぐことに繋がることと、まくらぎから道床への伝達荷重が緩和されることから、沈下抑制のさらなる効果が期待できる。また、USPのばね定数を通常のバラスト軌道の道床ばね定数（まくらぎ下の道床面を垂直方向に単位量だけ沈下させることに要する荷重強度）と同等レベルにすることで、碎石の代役になる可能性がある。今後、これらの効果が期待できるウレタンの材料に着目して開発を行う予定である。

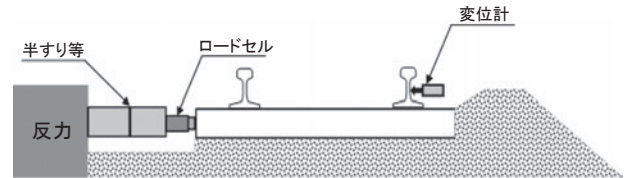


図22 道床横抵抗力測定

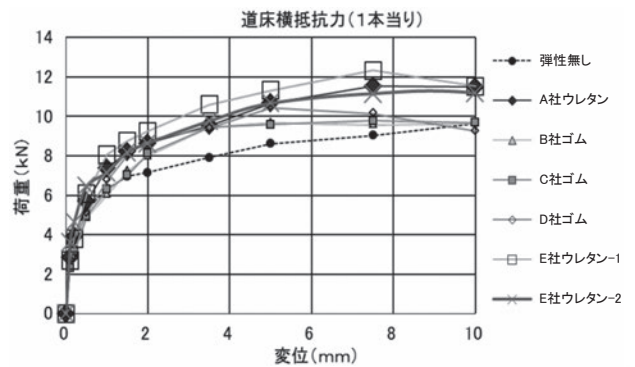


図23 道床横抵抗力測定結果

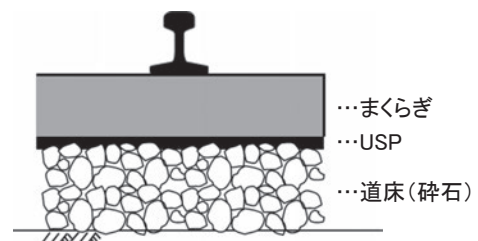


図24 USPと碎石の接触イメージ

4.4 これから行うUSPの開発

4.4.1 効果的なばね定数や形状の検討

列車速度や荷重等の条件を考慮し、図25のように道床との接触状態を模擬した試験体へ鉛直荷重や振動を与え、効果的なばね定数や厚さ等の形状を検討するとともに、図26のように、列車通過直後の初期沈下、列車通過時の上下振幅、列車通過後の復元といった弾塑性材の性能について効果を確認する。また、同試験体に対して、横方向から荷重を載荷し、1面せん断力を測定することで碎石の拘束力や耐劣化の評価を行い、USPとしての最適な形状や性能等を決定する。

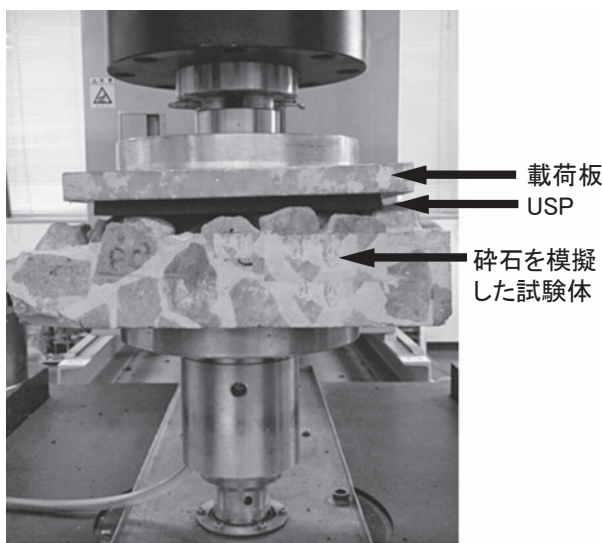


図25 USPの評価試験

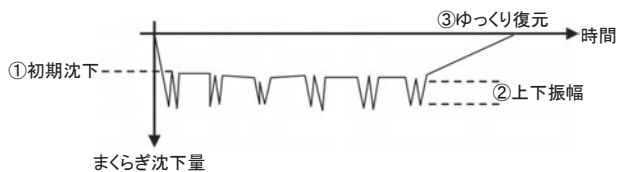


図26 弾塑性材のイメージ

4.4.2 実物大軌道試験装置での検証

4.4.1で検討したUSPを基に、弾性まくらぎを実軌道に敷設した際の効果や耐久性を総合的に評価・確認するため、実物大軌道試験装置を使用して、荷重、速度等の様々なパターンで軌道沈下特性や軌道ばね定数、振動特性、道床横抵抗等各種試験を行い、USPの性能評価および最適なUSPを選定する。

4.5 USPの可能性

ウレタンの特性を生かしたUSPを開発することで、振動低減による軌道沈下の抑制効果だけでなく、道床への伝達荷重の低減により、現行のまくらぎ厚をより薄くすることが可能となる。

また、道床が有しているばね定数を弾性体であるUSPが

持つことにより、まくらぎ自体が弾性化となる。この弾性特性を確保できることにより、道床不良である箇所の道床交換作業が不要となる可能性があるとともに、ウレタンの弾塑性特性により、道床に伝わる振動が減少し、ふん泥等の防止や地盤振動も減少する可能性がある。

5. おわりに

本稿では、これから行うPCまくらぎの薄型化および最適なUSPによる「I-MAKURAGI」の開発について、概要やそれらが持つ可能性について記述した。この開発が実現すれば、線区条件に適した材料の選定が可能となることから、材料コストや保守コストが大幅に削減することとなる。また、材料等のライフサイクルコストをふまえた採用や保守管理思想の変革も期待できると考えている。今後も引き続き、実導入に向けた研究開発を進める所存である。

参考文献

- 1) 三浦重、大石不二夫、横田敦、堀池高広：実用形有道床弾性まくらぎの開発、鉄道総研報告、Vol4、No5、1990.5
- 2) 堀池高広、半坂征則、柳川秀明、安藤勝敏、伊達和寛：低廉化有道床弾性まくらぎの開発、鉄道総研報告、Vol12、No3、1998.3
- 3) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説軌道構造【有道床軌道】(案)、1997.3
- 4) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説軌道構造、丸善出版、2012.1
- 5) 宮本俊充、渡辺偲年：線路-軌道の設計・管理、山海堂、1980.6